

短 編

港湾の新基準における耐震性能照査体系

長尾 毅*・野津 厚**

1. はじめに

港湾構造物の設計は、「港湾工事設計要覧」、「港湾構造物設計基準（昭和42年）」などを経て昭和54年から「港湾の施設の技術上の基準」に従って行われてきた。「港湾の施設の技術上の基準」はその後、平成元年、平成6年、平成11年および平成19年¹⁾の4度の改訂が行われてきた。ただし、平成6年の改訂は一部のみの改訂であり、全面的な改訂は10年程度の間隔で行われてきた。このうち、最新の平成19年版は性能設計体系の本格導入、地震動の扱いの大幅な改訂、破壊確率や変形量を指標とした新たな設計手法の導入という点で、これまでの改訂とは様相を異にする大改訂である。本稿では、平成19年版の港湾基準における地震動の扱いについて述べ、次に耐震性能照査手法を紹介する。

なお、性能設計体系の導入により、基準としては目的・要求性能（説明責任の観点から記述される性能）・性能規定（照査の観点から記述される性能）のみが規定され、性能照査手法等の具体的な仕様については基準の対象外となる。すなわち、法的な拘束力のかかる規定は、性能規定までであり、具体的な作用の設定方法、性能照査手法や許容される破壊確率、変形量等の限界値は設計者の判断に委ねられることになる。ただし、基準が設計者に正しく理解されるためには、性能照査方法の標準的な考え方や最低限度の限界値を例示する必要があり、法的な拘束力を有さない解説書の形式でこれらが示されることになる。従って、本稿で述べる方法はあくまで標準的な方法であることに注意されたい。

2. 地震動

今回の改訂では、土木学会第三次提言等を踏まえ、照査用地震動の考え方が大きく改訂されている。まず、定義については、レベル1地震動は「技術基準対象施設を設置する地点において発生するものと想定される地震動のうち、地震動の再現期間と当該施設の設計供用期間との関係から当該施設の設計供用期間中に発生する可能性の高いもの（レベル2地震動を除く）」、レベル2地震動は「技術基準対象施設を設置する地点において発生するものと想定される地震動のうち、最大規模の強さ

を有するもの」と定義されている。レベル2地震動の定義は土木学会第三次提言における定義と整合するよう配慮されている。

地震動の設定方法については、レベル1地震動は「地震動の実測値をもとに、震源特性、伝播経路特性及びサイト特性を考慮して、確率論的時刻歴波形を適切に設定」することになっており、レベル2地震動は「地震動の実測値及び想定される地震の震源パラメータ等をもとに、震源特性、伝播経路特性及びサイト特性を考慮して、時刻歴波形を適切に設定」することになっている。レベル1地震動のフーリエスペクトルは、いずれの周波数成分においても年超過確率が1/75であるような一様ハザードスペクトルとする。レベル2地震動は、過去に大きな被害をもたらした地震の再来、活断層の活動による地震、M6.5の直下地震等による地震動の中から最大規模のものを選定する。

具体的な地震動の設定手法は、設計者が独自の判断で選択することもできるが（照査アプローチA）、技術基準の解説書に記載された標準的な設定手法を用いることもできる（照査アプローチB）。以下、標準的な設定手法について述べる。

地震動の算定において必要となるサイト増幅特性は、対象港湾で得られた地震観測記録に基づいて評価する。対象港湾で地震観測記録が得られていない場合には、1～3年程度の地震観測を実施する。ただし工期が差し迫っている等の理由で地震観測ができない場合のため、周辺のK-NET等の地震観測地点におけるサイト増幅特性を補正して、対象港湾におけるサイト増幅特性を評価する方法も示されている。

レベル2地震動の算定のための震源パラメータの設定については次の通りである。まず、東南海・南海地震のように、過去に大きな被害をもたらした地震の再来を想定する場合には、過去のイベントがもたらした震度データ（場合によっては波形データ）と整合するような震源パラメータを用いる。活断層の活動による地震およびM6.5の直下地震を想定する場合に対しては、活断層の長さもしくは地震の規模に基づいて巨視的・微視的震源パラメータを設定する手順が示されている。強震波形計算では、堆積層が地震動の振幅と位相の双方に及ぼす影響を考慮することが推奨されており、具

* 国土技術政策総合研究所

** 港湾空港技術研究所

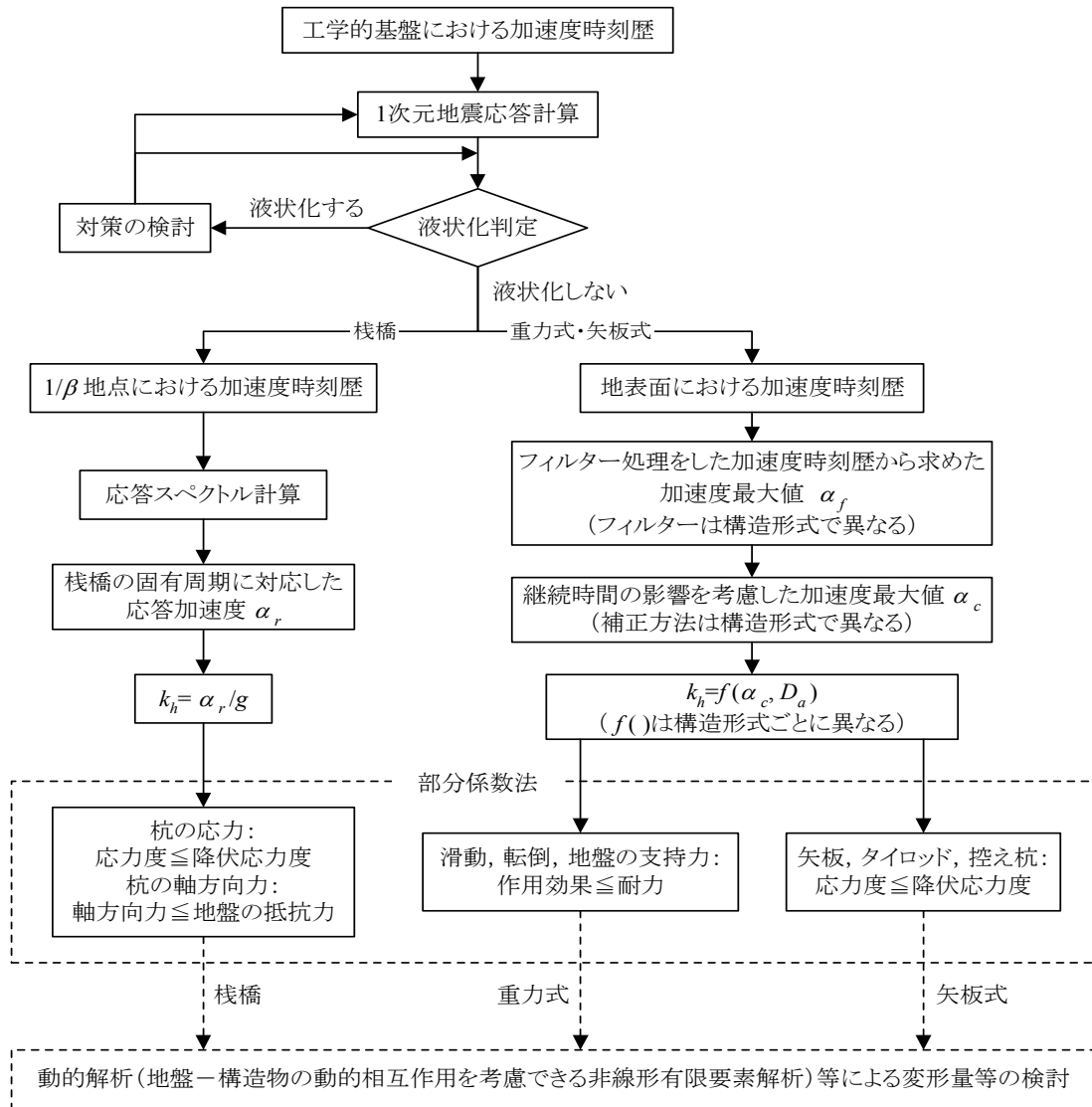


図1 レベル1地震動に対する耐震性能照査フロー

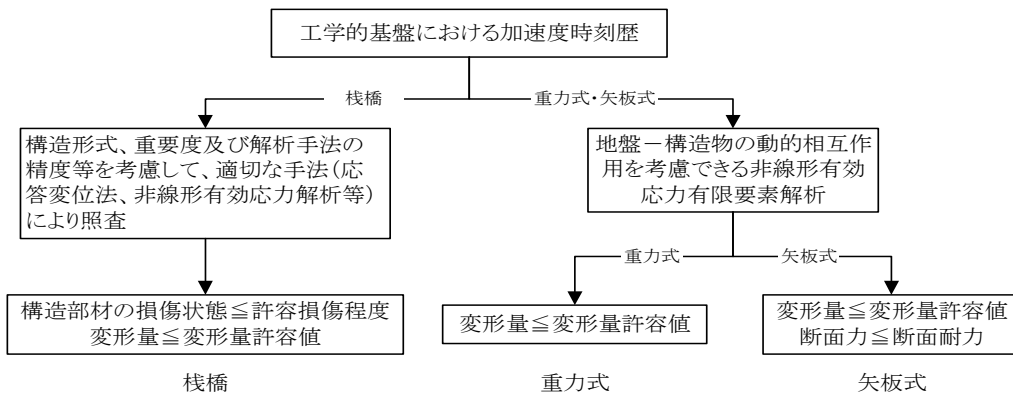


図2 レベル2地震動に対する耐震性能照査フロー

体的な方法として古和田他の方法^{2),3)}が紹介されている。

レベル1地震動については、対象地点のサイト特性を考慮した確率論的地震危険度解析⁴⁾により設定することを標準としている。

3. 耐震性能照査手法

3.1 性能照査の基本的考え方

性能設計体系における港湾構造物の性能照査手法の基本的な考え方は次の通りである。

まず、性能照査における許容値は、構造物の破壊確率や残留変形量など、構造物の性能を表す定量的な指標とする。レベル1地震動など、作用が確率的に評価されるものである場合は、許容値は極力、破壊確率などの確率的な指標とする。レベル2地震動など、作用が確定的に評価される場合は、許容値は残留変形量や断面力などの確定的な指標とする。

このような考え方に従って、港湾構造物の性能照査法の検討が行われた。ただし、レベル2地震動に対する耐震性能照査については、既に非線形有効応力解析が標準的な方法として実務においても広く用いられている状況であったため、研究の対象は主にレベル1地震動に対する性能照査に向けられた。

係留施設のうち重力式や矢板式等の岸壁のレベル1地震動に対する性能照査については、変形が支配的なモードとなるものの、従来の力の釣合いに基づく確定的な照査体系から、変形量に関する確率的な照査体系を構築することに困難を伴ったため、平成19年版の港湾基準における標準的な照査法としては、確定的な変形量に対応した性能照査用震度を算出する方法が採用された。ただし、確率的な変形量を制御する方法についても別途研究を進めているところである⁵⁾。

標準的な性能照査フローについて、図1にレベル1地震動に対するものを、図2にレベル2地震動に対するものを示す。以下では、レベル1地震動に対する耐震性能照査方法について述べる。

3.2 岸壁のレベル1地震動に対する性能照査

岸壁とはRC製のケーソンや矢板などにより直立壁を構成することによって船舶の接岸を可能とする係留施設であり、基本的に抗土圧構造物としての性格を有する。このため、地震動に対しては変形が支配的なモードとなる。ここで、矢板式の岸壁についても、基本的に軟弱地盤に建設されることから構造部材の断面力よりも変形が問題となることが指摘されている⁶⁾。

従来の性能照査法では、岸壁の変形量は評価しない手法が採用されていたが、新基準においては、岸壁の残留変形量を考慮した形で照査用震度を算定する方法⁷⁾が採用された。この方法においては、まず、工学的基盤におけるレベル1地震動を設定し、これを入力地震動として次元地震応答解析により、背後地盤における地表面の加速度時刻歴を算定する。地表面における加速度スペクトルから、重力式係船岸の変形に対応した周波数特性を勘案したフィルター処理を行う(式(1)~式(3))。ここで用いるフィルターは、周波数の異なる複数の正弦波に対して実施した地震応答解析の結果より、重力式係船岸の天端の水平残留変位が目標値となるような自由地盤地表面における加速度最大値を求めたものであり、地震動を構成する各周波数成分の波の岸壁の変形への寄与を評価したものである。よって、フィルター処理後のスペクトルは、一様変形スペクトルになるので、フーリエ逆変換(IFFT)後に得られる加速度最大値が周波数に関係なく一定の変形量と対応づけられる。次に、フィルター処理後の加速度時刻歴より加速度最大値 α_f を求め、地震動の継続時間を勘案した低減率 p を乗じ、地表面における補正加速度最大値 α_c を算出する(式(4)~式(5))。この補正加速度最大値 α_c と係船岸の天端において許容される変形量 D_a を用いて照査用震度の特性値を算出する。

$$a(f) = \begin{cases} b & (f \leq 1.0\text{Hz}) \\ \frac{b}{1 - \{g(f)\}^2 + c_1 g(f) i} & (f > 1.0\text{Hz}) \end{cases} \quad (1)$$

$$g(f) = 0.34(f - 1.0) \quad (2)$$

$$b = c_2 \frac{H}{H_R} - c_3 \frac{T_b}{T_{bR}} + c_4 \frac{T_u}{T_{uR}} - c_5 \quad (3)$$

ここに、 f : 周波数(Hz)、 i : 虚数単位、 H : 壁高(m)、 H_R : 基準壁高(=15.00m)、 T_b : 背後地盤の初期固有周期(s)、 T_{bR} : 背後地盤の基準初期固有周期(=0.80s)、 T_u : 壁体下(重力式)または海底面下(矢板式)地盤の初期固有周期(s)、 T_{uR} : 壁体下(重力式)または海底面下(矢板式)地盤の基準初期固有周期(=0.40s)、 $c_1 \sim c_5$: 定数で、次のとおり; $c_1 = 6.8$ (重力式); 11.0(矢板式)、 $c_2 = 1.05$ (重力式); 2.25(矢板式)、 $c_3 = 0.88$ 、 $c_4 = 0.96$ 、 $c_5 = 0.23$ (重力式); 0.96(矢板控え直杭式); 0.76(矢板控え組杭式)

$$p = c_6 \ln(S/\alpha_f) - c_7 \quad (4)$$

$$\alpha_c = p \cdot \alpha_f \quad (5)$$

ここに、 S ：フィルター処理後の 100Hz サンプリング加速度自乗和平方根(Gal)、 α_f ：フィルター処理後加速度最大値(Gal)、 $c_6 \sim c_7$ ：定数で、以下のとおり； $c_6=0.36$ (重力式、矢板控え直杭式)； 0.31 (矢板控え組杭式)、 $c_7=0.29$ (重力式)； 0.20 (矢板控え直杭式)； 0.10 (矢板控え組杭式)、 α_c ：補正加速度最大値(Gal)

$$k_h = c_8 \left(\frac{D_a}{D_r} \right)^{c_9} \cdot \frac{\alpha_c}{g} + c_{10} \quad (6)$$

ここに、 k_h ：照査用震度、 D_a ：変形量許容値(cm)、 D_r ：基準変形量(=10cm(重力式)；15cm(矢板式))、 α_c ：補正加速度最大値(Gal)、 g ：重力加速度(=980Gal)、 $c_8 \sim c_{10}$ ：定数で、以下のとおり； $c_8=1.78$ (重力式)； 1.91 (矢板控え直杭式)； 1.32 (矢板控え組杭式)、 $c_9=-0.55$ (重力式)； -0.69 (矢板控え直杭式)； -0.74 (矢板控え組杭式)、 $c_{10}=0.04$ (重力式)； 0.03 (矢板控え直杭式)； 0.05 (矢板控え組杭式)

紙幅の関係でこの方法について詳細を示すことは出来ないが、一例として重力式岸壁について式(1)~(3)のフィルターを示すと図3のようになる。岸壁は高い周波数成分に対しては変形しにくく、かつ壁高が高く、地盤が軟弱であるほど変形しやすいという特徴が適切に反映される結果となることが分かる。

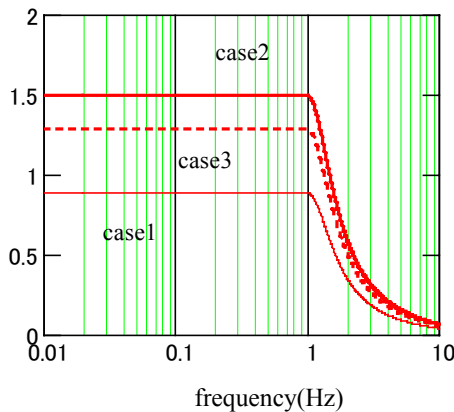


図3 重力式岸壁のフィルターの場合

表1 フィルター算出条件

	H	T_b	T_u
case1	11.50	0.80	0.40
case2	14.50	1.20	0.75
case3	11.50	1.20	0.75

このほか、栈橋は杭-上部工のラーメン構造であるが、栈橋については図1に示したように、スペクトル応答加速度に基づく震度を算出することとなるが、標準スペクトルを用いるのではなく、各サイトごとの地震波形を用いた応答スペクトルをもとにした部分係数法による⁸⁾こととしている。この部分係数は、信頼性解析により目標とする信頼性指標を設定して、設計パラメータの確率分布を考慮して設定されたものである。

4. おわりに

現在、新しい「港湾の施設の技術上の基準・同解説」印刷に向けての最終校正中であり、近々市販される運びである。今回は多くの新しい技術が取り込まれたが、性能照査体系として完成されたものではなく、今後も引き続き性能照査方法の合理化・高度化に向けて取り組んでいく必要があると考えている。

参考文献

- 1) 国土交通省港湾局監修、日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説、2007（印刷中）
- 2) 古和田明、田居 優・岩崎好規・入倉孝次郎：経験的サイト増幅・位相特性を用いた水平動および上下動の強震動評価、日本建築学会構造系論文集、Vol.514、97~104、1998。
- 3) 野津 厚、菅野高弘：経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法—内陸活断層地震および海溝型地震への適用性の検討—、港湾空港技術研究所資料、No.1120、2006。
- 4) 長尾 毅、山田雅行、野津厚：フーリエ振幅と群遅延時間に着目した確率論的地震ハザード解析、土木学会論文集、No.801/I-73、141-158、2005。
- 5) 長尾 毅：岸壁の残留変形量に関する地震時信頼性指標の簡易評価法、構造工学論文集 Vol. 53A、pp. 351-359、2007
- 6) 長尾 毅、尾崎竜三：控え直杭式矢板岸壁のレベル1地震動に対する性能規定化に関する研究、地震工学論文集、CD-ROM、2005
- 7) 長尾 毅、岩田直樹：重力式及び矢板式岸壁のレベル1地震動に対する耐震性能照査用震度の設定方法、構造工学論文集 Vol. 53A、pp. 339-350、2007
- 8) 長尾 毅、菊池喜昭、藤田宗久、鈴木 誠、佐貫哲朗：栈橋式係船岸のレベル1地震動に対する信頼性設計法、構造工学論文集 Vol. 52A、pp. 201-208、2006